

DESIGN STUDY OF POP ECRIPAC FOR FUTURE CANCER THERAPY

Takuya Ishibashi, Toshiyuki Hattori, Noriyosu Hayashizaki, Taku Ito, Jun Tamura, Liang Lu
Tokyo Institute of Technology, Research Laboratory for Nuclear Reactors
2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550

Abstract

Electron Cyclotron Resonance Ion Plasma ACcelerator (ECRIPAC) accelerates ions with PLEIADE principle that interaction between electrons and ions in ECR plasma accelerate ions. In order to obtain higher energy electrons, it is necessary to reaccelerate the electrons by GYRAC principle that is synchrotron like acceleration which used RF wave power and magnetic field which is growing in time. ECRIPAC that used these two principles is proposed by Geller and Golovanivsky. ECRIPAC is able to accelerate 10^8 carbon ions per pulse by the simple model calculation of Geller and Golovanivsky with a 2m accelerator. However, Proof of Principle (POP) has not demonstrated to the present day. Therefore, we suggest a basic structure of POP ECRIPAC and report about a simulation electromagnetic field distribution in the device.

次世代がん治療のためのPOP ECRIPAC設計検討

1. はじめに

Electron Cyclotron Resonance Ion Plasma ACcelerator (ECRIPAC)は1990年にR. Geller、K. Golovanivskyらによって提唱された加速器である[1]。ECRIPAC型加速器はPLEIADEとGYRACの原理によりイオンを高エネルギーに加速する、プラズマ型加速器である。この装置ではプラズマ生成による電子の発生、高エネルギー電子の発生、多価重イオンの発生、そして重イオンの加速が同一装置内で行えるのが特徴である。しかし、現在までにECRIPACの原理実証は行われていない。

R. Gellerらが提唱した単純なモデルによれば、ECR磁場に超伝導ソレノイドを用いると、がん治療に必要な360MeV/uの炭素イオンを2mの加速長で1パルス当たり 10^8 個加速可能なことが見込まれる(表1)。また、常伝導ソレノイドの場合には7.8mの加速長となる。これが実現すれば、現在国内で稼働中のがん治療用加速器が5-10m以内に収まる可能性がある。

表1：がん治療用加速器と原理実証機の設計パラメータ

Acceleration Particle	C ⁴⁺	C ⁴⁺
Output Energy (MeV/u)	360	20
Output Particle No. (p/p)	2.5×10^8	2.5×10^7
μ Wave Frequency (GHz)	2.45	2.45
μ Wave Power (kW)	480	48
Pulse Width (ms)	100	100
Electron Density (p/cm ³)	3×10^{12}	3×10^{11}
Acceleration Length (m)	2	2
Cavity Diameter (cm)	10	10
Max. Mirror Field (T)	2.6	0.45
Final Mirror Field (T)	1.3	0.25
ECR Mirror Field (T)	0.087	0.087
Acceleration Rate (GeV/m)	2.16	0.12

2. 加速原理

シングルミラー磁場中に電子サイクロトロン共鳴により加速された電子は、加速軸と直角の平面方向へ加速力を受ける。このとき同時に発生する多価重イオンは、次式で与えられるように電子のエネルギーに比例したエネルギーを得る。

$$W_i = W_e \left(1 - \frac{B_1}{B_0}\right)$$

ここで W_i 、 W_e はそれぞれイオン、電子のエネルギー、 B_0 、 B_1 はそれぞれミラー磁場の最小、最大強度である。これはPLEIADE原理と呼ばれている[2]。しかしこのとき電子のエネルギーは数百keV程度であり、電子密度もそれほど大きくならない。

そこでECR磁場より10-20倍以上大きなシングルミラー磁場を発生させておき、パルスコイルにより逆磁場を発生させてECR磁場強度まで下げる。そしてミラー磁場が元に戻る際にパルスマイクロ波により電子を高エネルギーに加速する。このとき電子が得るエネルギーは次式で与えられる。

$$W_e = m_0 c^2 \left(\frac{B_s}{B_0} - 1\right) = 0.51 \left(\frac{B_s}{B_0} - 1\right)$$

ここで B_s はリバースコイルが停止した時のECRゾーン内磁場強度である。これはシンクロトロンライクな加速であり、GYRAC原理と呼ばれている[3, 4]。

パルスマイクロ波が止まった後、磁場上昇に伴いプラズマ径が小さくなり、高密度なプラズマに圧縮される。これによりECRゾーン内のイオンは圧縮された高密度電子にPLEIADE原理により加速され、高エネルギーイオンが発生する。

最終的に電子とイオンの持つ磁気モーメント μ により加速軸方向に $-\mu \nabla B$ の力を受け、磁場の減衰方向に加速される。そしてイオンはこの大量の電子

からクーロン相互作用を受け、加速軸方向へ加速される。

3. 基本構造

POP ECRIPACは288、44、26ターンのソレノイドコイル、逆磁場を発生させる1ターンのリバースコイル、それらを取り囲むFe製のヨークで構成されている(図1)。チェンバー内径は100mmとした。また、リバースコイルのパルス運転によって装置内磁場分布に歪みが生じない様、チェンバーの材質は絶縁物にする予定である。投入するマイクロ波周波数は2.45GHzとし、この時ECR磁場は0.087Tとなる。

R. Gellerらが提唱した単純なモデルでは、磁場が発散的であるため、加速につれ電子とイオンは空間的に広がり、失われてしまう。この問題を解決するために、装置の射出側で磁場の加速軸成分が強くなるようにした。それに加えECRイオン源で電子とイオンを半径方向に閉じ込めるために使われている多極磁石を、収束・発散と交互に配置する構造をPOP ECRIPAC装置に組み込んだ。これにより電子とイオンの半径方向の発散を防ぐ。

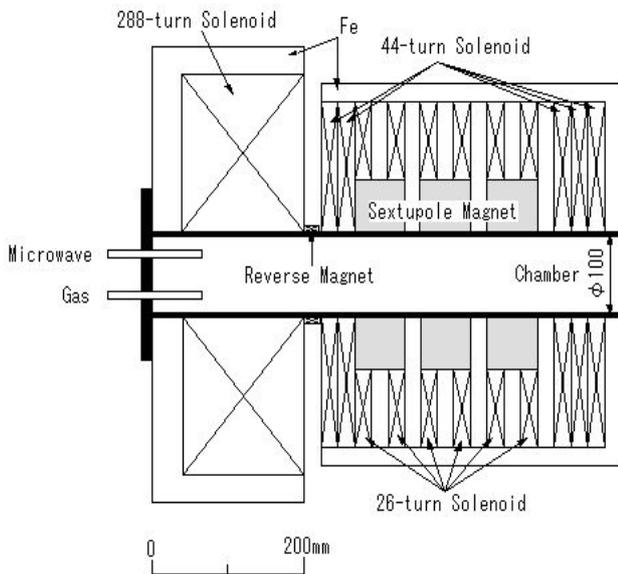


図1 : POP ECRIPAC装置概略図

4. 電磁場シミュレーション

COMSOL Multiphysicsの電磁気学モジュールを用いて、図1の構造における装置内電磁場分布を3次元シミュレーションした(図2)。各コイルの電流条件は288、44、26ターンのソレノイドではそれぞれ347.2、200、200A、リバースコイルは29kAとした。

本計算結果より、リバースコイル作動時にECRゾーン内の磁場はECR磁場以下になっているのが分かる。また、リバースコイル停止時にはECRゾーン内の磁場が約0.45Tとなり、GYRACの原理によりECRプラズマ内の電子は2.13MeVまで加速されるこ

とになる。したがって、この計算モデルで加速に必要な電磁場分布を得られることが分かった。

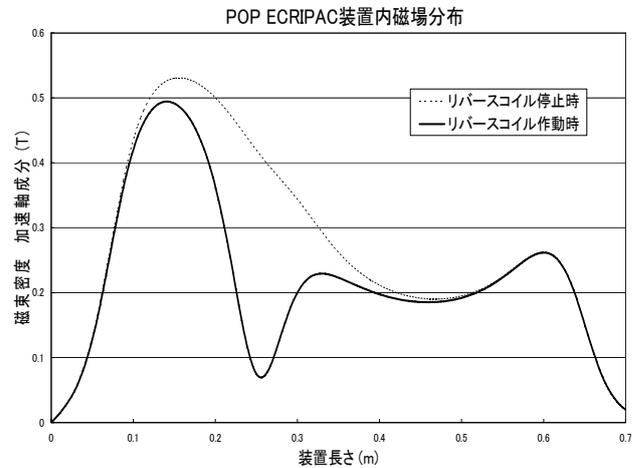


図2 : POP ECRIPAC装置内磁場分布

5. まとめと今後の予定

ECRIPACは一つの装置内でプラズマ生成による電子の発生、高エネルギーの発生、多価重イオンの発生、加速が行える装置であり、これが実現すれば重イオン線を用いたがん治療が普及する可能性がある。

しかし、R. Gellerらが提唱した単純なモデルでは磁場が発散的であるために電子、イオンが加速に伴って失われてしまう。そこで我々はこの問題点を解決し、また加速に必要な磁場分布が得られるPOP ECRIPACの基本構造を提案した。このモデルに対し電磁場シミュレーションを行い、加速に必要な電磁場が装置内に発生することが分かった。

より効率的に加速を行うためには速度の異なる電子とイオンの間に生じるクーロン相互作用を強める必要がある。プラズマ内における電子とイオン間の相互作用を数値シミュレーションするのは困難なため、POP ECRIPACの実機を作成し、実験を行う予定である。それと平行して簡単なシミュレーションコードを作成し、実験データとの比較を行う。これにより電子、イオン間の相互作用が強くなるような磁場勾配の最適化を行う予定である。

参考文献

- [1] R.Geller and K.Golovanivsky, Proceedings of the 10th International Workshop on ECR Ion Sources. 199-222, 1990
- [2] B. Bardet, T. Consoli and R. Geller, Phys. Lett. **10** 67-69, 1964
- [3] V. V. Andreev and A. M. Umnov, Plasma Sources Sci. Technol. **8** 479-487, 1999
- [4] K. S. Golovanivsky, Phys. Scr. **22** 126-133, 1980